

张力计的辊高差对板形检测精度的影响

王向丽 李谋渭 张少军 陈 工 边新孝

北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

摘 要 以一种工程应用的张力计为分析对象,建立了存在辊高差的张力计一带材三维有限元模型.以辊高差为基本变量,通过改变高低辊位置、带材厚度及带材平均张应力,得到了不同情况下辊高差导致的板形检测误差值及其分布规律.
关键词 热轧机;板形控制;检测误差;有限元法
分类号 TG 333.7

Effect of the roller-height-difference of tensioneter loopers on the precision of flatness measurement

WANG Xiang-li LIMou-wei ZHANG Shao-jun CHEN Gong BIAN Xin-xiao
School of Mechanical Engineering University of Science and Technology Beijing Beijing 100083, China

ABSTRACT This article took a tensioneter looper during hot rolling as the object of study. A three-dimensional finite element model was built for a tensioneter looper with roller height difference and a hot rolling strip. Considering roller height difference as a basic variable, the measurement error of flatness caused by roller height difference and its distribution rule under different situations were obtained by changing the arrangement of high and low rollers, the strip thickness, and the average tensile stress of the strip.
KEY WORDS hot rolling mills; profile control; measurement error; finite element method

配备高精度的在线板形检测装置(即板形仪)是实现板形控制系统自动化、提高产品板形质量的关键之一^[1].对于冷轧带钢、铝带及铝箔,普遍采用高精度压磁式板形仪^[2]和空气轴承式板形仪^[3-4];对于热连轧带钢,由于板形仪需要工作在高温、高湿和高尘的恶劣环境,所以通常采用非接触的光学式板形仪^[5].但是,光学式板形仪的最大缺点是:只能检测表观浪形;当被测带钢处于一定张力下,其相当一部分浪形被隐藏,此时带钢的部分板形甚至全部板形无法被检测出,造成板形检测误差.

从20世纪70年代末开始,就有国外大型钢铁企业或科研单位进行热连轧接触式板形仪的研发,其中成功进行研发和使用的主要有德国赫施(Hoesch)钢铁公司^[6-7]、韩国浦项(POSCO)钢铁公司^[8-9]以及德国西马克-德马格(SMS Demag)公司

三家.它们所研发的板形仪的共同特点是:在机械结构上与冷轧用压磁式板形仪和空气轴承式板形仪有相似之处,都有一排分段辊,通过一定包角直接与轧材接触,由此决定了这类热轧板形仪与冷轧板形仪具有相似的板形检测原理,都是通过测量轧材传递给各分段辊的力求得轧材横向张应力差分布情况.国内北京科技大学也提出了自己的热连轧接触式板形仪专利^[10].

对于这一类板形仪,各分段辊辊面与带钢的接触情况是精确检测板形的关键,因此对各分段辊的相对位置有设计和使用要求,其中最重要的是限制各辊面高度差(简称为“辊高差”).SMS Demag公司明确提出要求:当辊高差超过一定量,产生明显板形检测误差时,要通过一定装置对辊高差进行检测,并对各分段辊辊面进行机械调整.

1 张力计的板形检测原理及分段辊辊高差的定义

德国西马克-德马格公司的张力计 (tensimeter looper TML)是近年来应用于热连轧带材的一种接触式板形仪 (图 1),其三维结构示意图见图 2. 张力计前端的一排分段辊与热轧带材直接接触,从操作侧到传动侧按后轴轴向依次排列,标号为辊 1~13;每个分段辊有自己的支撑轴、支撑架以及传感器;传感器均布安装在后轴的轴向长槽内;支撑架呈空心三角形,其后上端与后轴为铰接连接,后下端与传感器上表面通过接触来传力.

张力计的机构和单个分段辊及其支撑部件的受

力简图如图 3 所示. 图中,下标 i 对应第 i 个分段辊, O 、 P_i 、 M 和 N 分别为张力计后轴轴心、分段辊辊心、铰接点和传感器接触点, θ 、 α 和 β 分别为张力计的上升角、带材前后包角 (对各分段辊,它们的值相同), F_{Ti} 、 F_{Si} 分别为带材传递给分段辊的力 (带钢重力除外)、传感器对辊支撑架的作用力 (其值与传感器受到的带材作用力大小相等,方向相反), F_{Mxi} 、 F_{My} 分别为支撑架铰接处的水平及竖直支反力, l_t 、 l_s 分别为带材传递给分段辊的力对铰接点的力臂以及传感器处作用力对铰接点的力臂 (对各分段辊,它们的值相同).

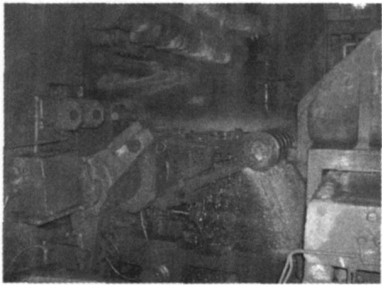


图 1 张力计的现场使用情况
Fig. 1 Operation of TML in a factory

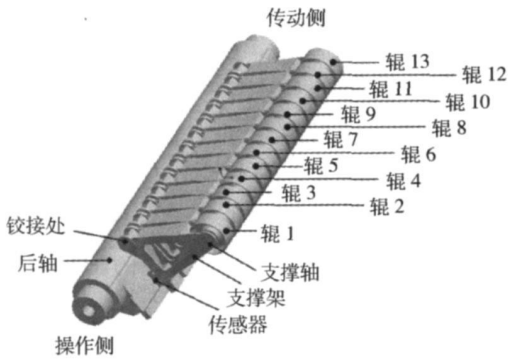


图 2 张力计的三维结构示意图
Fig. 2 3D sketch map of a tensimeter looper

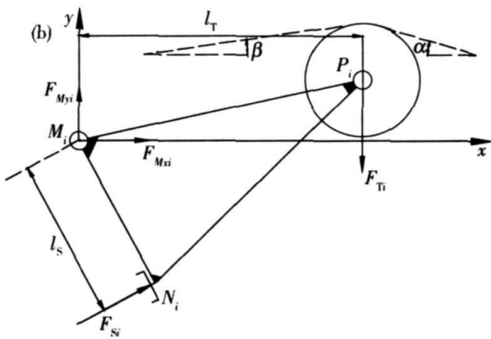
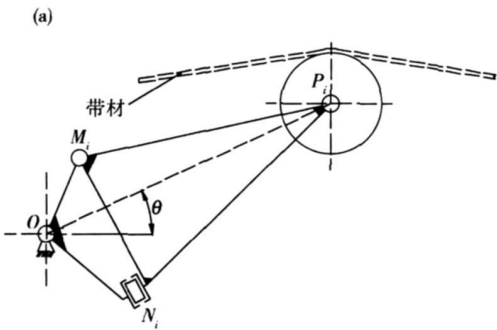


图 3 张力计机构图 (a)和单个分段辊及其支撑部件的受力简图 (b)
Fig. 3 Sketch map of the TML mechanism (a) and force diagram of one segmented roller and its support (b)

F_{Ti} 和 F_{Si} 的关系如下:

$$F_{Ti} = \frac{l_s}{l_t} F_{Si} \tag{1}$$

F_{Ti} 与各分段辊对应的带材张力 T 的关系如下:

$$F_{Ti} = 2T_i \sin \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) \tag{2}$$

$$T_i = W_r h \sigma_i \tag{3}$$

式中, T 为分段辊 i 对应的带材张力, W_r 为分段区域宽度, h 为带材厚度, σ_i 为分段辊 i 对应的带材的张应力.

由式 (1)~(3)得到 σ_i 与 F_{Si} 的关系式:

$$\sigma_i = \left[2 \frac{l_s}{l_t} W_r h \sin \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) \right]^{-1} F_{Si} \tag{4}$$

这样,由各分段辊的传感器测得 F_{Si} ,通过式 (4)求出各分段辊对应区域的带材张应力 σ_i ,进而求得带材横向张应力差的分布情况,即带材板形情况.

以上是基于二维受力计算的张力计板形检测原理,其前提假设条件是各分段辊的辊面高度完全相同.当存在辊高差时,各传感器检测到的 F_{Si} 不同,

产生力差值 ΔF_s ; 此力差值并不是由于板形不良所造成的, 而是因为高、低辊面与带材的接触情况不同所造成, 因而构成板形检测误差.

辊高差的概念是由西马克-德马格公司提出的. 在进行板形检测之前, 将各分段辊圆周上的标记点 (出厂前已标记好) 转至最上面, 选择此处母线中点作为检测代表点, 各分段辊检测代表点在竖直方向上的相对高度差称为辊高差. 假设共 n 个分段辊, 各分段辊检测点高度 $G_i (i=1, 2, \cdots, n)$ 不绝对相同, 则分段辊 i 的辊高差为 $\Delta h_{ij}=G_i-G_j$, 所有辊的最大辊高差为 $\Delta h_{\max}=G_{\max}-G_{\min}$.

为了保证张力计的板形检测精度, 该公司将辊高差标定值确定为 $\Delta h_{\max}=0.030\text{ mm}$, 即使用前必须将所有分段辊的辊高差调整在 0.030 mm 以内.

2 分段辊辊高差对板形检测精度影响的有限元分析

2.1 张力计-带材有限元模型

建立张力计-带材的整体三维 ANSYS 有限元模型, 如图 4 所示.

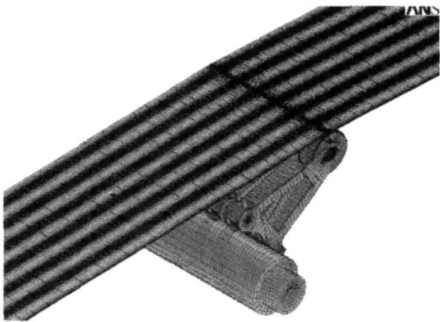


图 4 带材-张力计的三维 ANSYS 有限元模型
Fig 4 3D finite element model of the strip and TML

模型建立过程有以下几个关键方面: (1) 考虑到结构的对称性, 取结构的一半建立模型. 带材采用 SOLID45, 网格数量为 88 580 个; 张力计网格数量为 363 378 个, 其中 8 000 个为 SOLID95, 其余为 SOLID45. (2) 建模时将分段辊辊高差体现为分段辊的半径差. (3) 带材和分段辊的接触以及传感器上表面和支撑件的接触区网格划分较密, 接触算法采用 Augmented Lagrange Method, 摩擦因数设置为 0. (4) 有限元分析的常量及变量分别见表 1 和 2.

表 1 有限元分析常量
Table 1 Constants of finite element analysis

高温带材 (900℃)			张力计						活套角, $\theta/ (^{\circ})$
弹性模量, E/MPa	泊松比, μ	宽度, W_s/mm	弹性模量, E/MPa	泊松比, μ	辊半径, R/mm	辊宽, W_r/mm	辊间隙 / mm	辊数	
15 000	0.35	1 660	206 000	0.28	122.5	100	30	13	

表 2 有限元分析变量
Table 2 Variables of finite element analysis

带材厚度, h/mm	平均张应力, $\bar{\sigma}/\text{MPa}$	张力计辊高差, $\Delta h_{ij}/\text{mm}$
1, 2, 3, 4	0~10.35	0.015, 0.030, 0.045

2.2 辊高差相同、高低辊位置不同时的模型分组

在实际应用中, 进行分段辊的辊高差调整时, 只要各辊高差在 0.030 mm 以下即可, 对于具体辊高差数值及其高低辊所在位置并无进一步要求. 为了分析辊高差相同、高低辊所在位置不同对检测精度的影响, 在有限元分析中, 按照高低辊位置的分布特点, 对高低辊位置进行分组如下: 设辊高差 $\Delta h_{\max}=0.030\text{ mm}$, 高辊半径取理论值 $R=122.5\text{ mm}$, 低辊半径取 $R-\Delta h_{\max}=122.5-0.03=122.47\text{ mm}$, 共 13 个辊. 高低辊所处位置和数量按总体规律的不同进行分组: 第 1 组总体按“高一低一高”排列, 第 2 组总体按“低一高一低”排列, 第 3 组总体按“高低间隔”

排列, 每一组高低辊位置又分为五种情况, 具体如图 5 所示.

2.3 结果分析

2.3.1 不同高低辊位置对板形检测精度的影响
当取 $\theta=25^{\circ}$, 带厚 $h=1\text{ mm}$, 带材平均张应力 $\bar{\sigma}=8.275\text{ MPa}$, 辊高差 $\Delta h_{\max}=0.030\text{ mm}$, 高低辊分布情况按 2.2 节分组时, 得到各情况下各分段辊传感器受到的带材作用力 F_s . 结果表明: 对于任意一种情况, 初始状态的带材只与高辊面接触, 不与低辊面接触, 低辊传感器不受带材作用力作用; 在带材具有一定平均张应力之后, 各低辊辊面上的局部带材由初始不与辊接触状态变为接触状态, 使各低辊的传感器也检测到带材作用力, 但各低辊对应 F_s 值比各高辊的 F_s 要小. 尤其需要注意的是: 对于第 1、2 组, F_s 值最小的低辊位置与 F_s 值最大的高辊位置是相邻的. 辊高差导致的各传感器受到带材作用力的最大差 $\Delta F_{s-\max}$ 以及对应的板形检测误差见表 3.

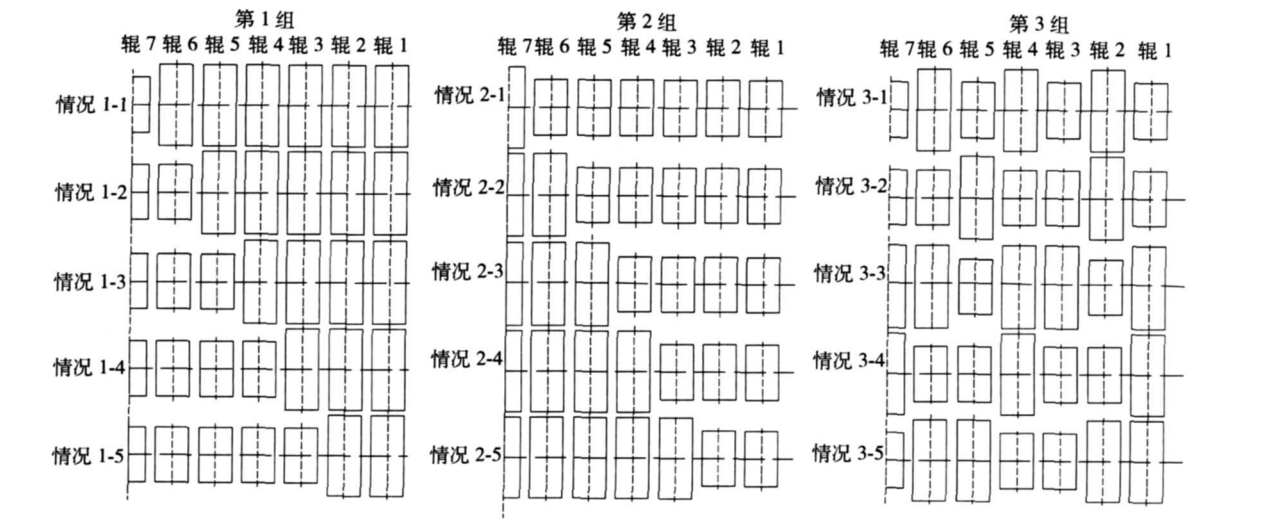


图 5 高低辊不同位置的分组情况示意简图 ($\Delta h_{\max}=0.030\text{mm}$)

Fig 5 Grouping diagram of high and low segmented rollers with different arrangements($\Delta h_{\max}=0.030\text{mm}$)

表 3 三组高低辊的 $\Delta F_{T-\max}$ 和板形检测误差值

Table 3 $\Delta F_{T-\max}$ and flatness measurement errors for 3 groups of high and low rollers

位置 情况	$\Delta F_{S-\max}$ / N	板形检测 误差 /I	位置 情况	$\Delta F_{S-\max}$ / N	板形检测 误差 /I	位置 情况	$\Delta F_{S-\max}$ / N	板形检测 误差 /I
1-1	4.69	1.48	2-1	4.67	1.47	3-1	16.69	5.26
1-2	3.34	1.05	2-2	3.34	1.05	3-2	5.01	1.58
1-3	3.32	1.05	2-3	3.32	1.05	3-3	4.73	1.49
1-4	3.30	1.04	2-4	3.32	1.05	3-4	4.82	1.52
1-5	3.26	1.03	2-5	3.36	1.06	3-5	4.79	1.51

注：I为板形的单位， 10^{-5} 。

分析表 3 数据，结合图 5 高低辊分布情况，说明当辊高差为 0.030mm 时有以下结果。

(1) 第 3 组的高低辊间隔分布情况引起的板形检测误差比其他两组大，其中误差最大的是分段辊一高一低间隔分布的 3-1 情况，达到 5.26 I

(2) 对于第 1 组的“高一低—高”分布，板形检测误差最大的情况是 1-1，达到 1.48 I 其余情况下的误差值都明显偏小，数值有轻微下降趋势，差别并不大。第 2 组的误差规律和第 1 组相似，误差值的大小也与第 1 组各情况接近。

(3) 误差值最大的 3-1 情况，即分段辊一高一低间隔分布情况，在张力计使用前进行辊高差调整时注意避免此种情况，之后在实际使用中出现的几率很小，而情况 1-1、2-1 及第 3 组中除 3-1 以外的共六种情况对应的板形检测误差值都在 1.50 I 左右，可将这些情况都作为典型情况进行

考虑。

在以下的分析中，需要将辊高差作为变量进行计算，此时就选择高低辊位置具有典型性、高低辊建模最快捷的 1-1 情况作为代表情况。

2.3.2 不同辊高差对板形检测精度的影响

图 6 是带材平均张应力 $\bar{\sigma}$ 为 $0\sim 10.35\text{MPa}$ 带厚 h 为 $1\sim 4\text{mm}$ ，辊高差 $\Delta h_{\max}$ 为 0.015 、 0.030 和 0.045mm ，高低辊位置情况为 1-1 时，通过获得各辊对应传感器受到的带材作用力得到的板形检测误差计算结果。可以看出：(1) 带材平均张应力值较大 (大于 6MPa)、带厚一定时，辊高差和板形检测误差呈线性比例关系。(2) 带材平均张应力值较小 ($\bar{\sigma}$ 为 $0.41\sim 6\text{MPa}$) 时，对于 h 为 1mm 的薄带材，辊高差依然与板形检测误差呈线性比例关系；但带材平均张应力越小、带材越厚、辊高差值越大，曲线越偏离线性关系区，位于其下方。

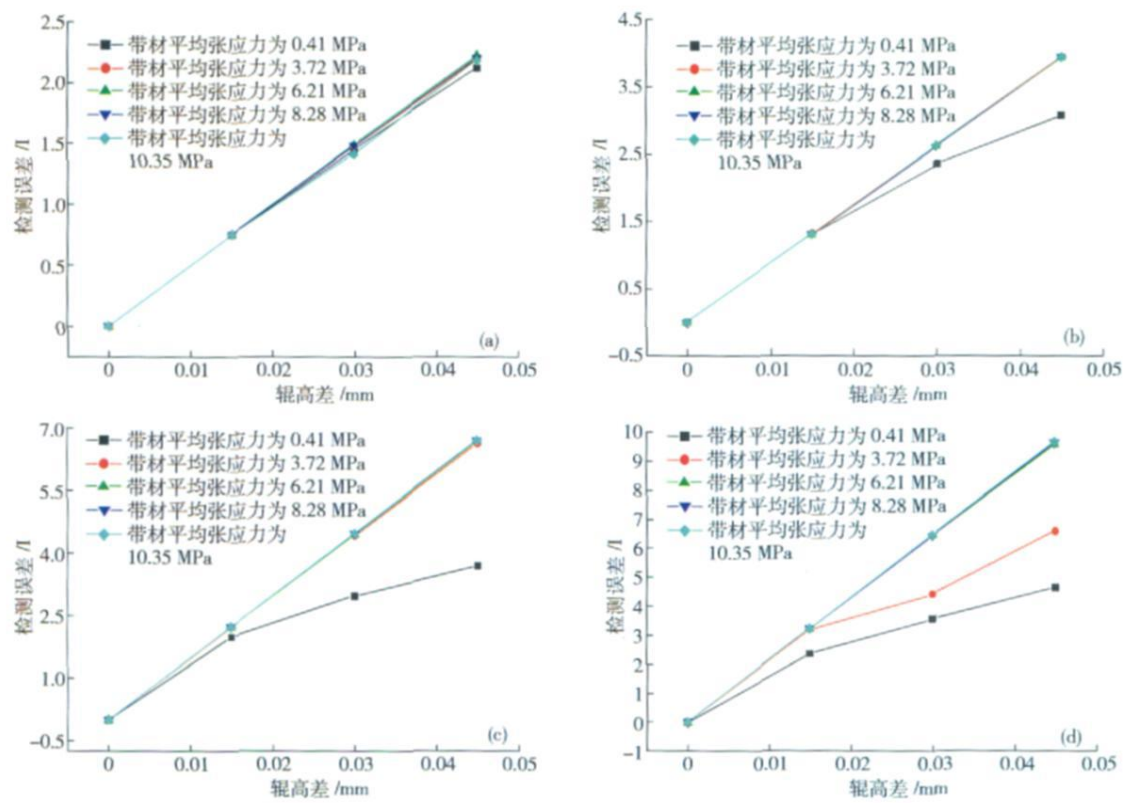


图 6 板形检测误差与辊高差之间的关系曲线· (a) $h=1\text{mm}$; (b) $h=2\text{mm}$; (c) $h=3\text{mm}$; (d) $h=4\text{mm}$

Fig 6 Relation curves of flatness measurement error and roller height difference (a) $h=1\text{mm}$; (b) $h=2\text{mm}$; (c) $h=3\text{mm}$; (d) $h=4\text{mm}$

(3) 辊高差一定时,带材越厚,如图 7 所示,板形检测误差越大. 带材平均张应力较小时,曲线的线性

度很好;带材平均张应力较大时,辊高差越大,曲线非线性程度越大,说明误差受带材厚度影响越大.

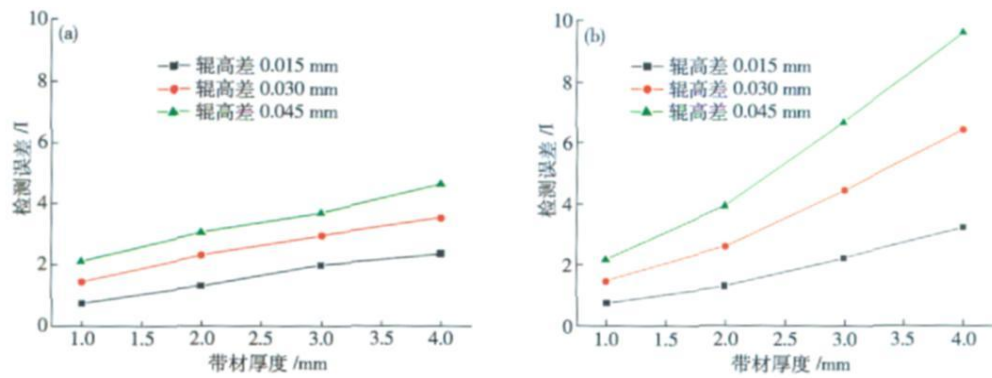


图 7 板形检测误差与带材厚度之间的关系曲线· (a) $\bar{\sigma}=0.41\text{MPa}$; (b) $\bar{\sigma}=8.28\text{MPa}$

Fig 7 Relation curves of flatness measurement error and strip thickness (a) $\bar{\sigma}=0.41\text{MPa}$; (b) $\bar{\sigma}=8.28\text{MPa}$

表 4 是现场实测张力计各分段辊的带材张力 T 情况. 由表 4 可知:分段辊 10 对应的传感器检测到的带材张力比其他力小很多,其原因是此处辊面最低,带材与辊面接触情况与其他高辊处不

同,影响了传感器受力,导致了板形检测误差;各分段辊有不同程度的剧烈磨损时,传感器所测得的带材张力误差很大,说明此时需对张力计进行检修.

表 4 各辊带材张力的现场数据
Table 4 Field data of strip tension for every roller

分段 辊辊号	带材张力, T_i /N	
	现场数据 1	现场数据 2
1	920.10	492.55
2	1 664.43	10.76
3	2 603.99	427.32
4	2 334.82	594.41
5	2 406.46	525.05
6	2 608.34	7 499.47
7	2 603.99	279.92
8	1 953.05	316.77
9	3 756.41	429.26
10	828.78	12.82
11	3 680.42	43.26
12	3 777.92	7 599.77
13	525.05	1 382.12

2.4 辊高差导致板形检测误差的原因

辊高差的存在使得原本处于平均张应力下的带材在高辊处及低辊处的张应力分布出现差异. 图 8 为带材平均张应力 $\bar{\sigma}$ 为 0.41 MPa 带厚 h 为 1 和 4 mm, 辊高差 $\Delta h_{\max}$ 为 0.015、0.030 和 0.045 mm 时, 带材中性面的张应力分布. 图中显示出各分段辊之上带材的张应力分布有以下特点.

(1) 低辊辊 7 上的带材张应力比其他高辊上同位置的带材张应力都小. 观察图 8 中 (b1)、(b2) 和 (b3) 组图及 (c1)、(c2) 和 (c3) 组图发现: 辊高差越大, 低辊面上带材最小张应力的区域范围越广.

(2) 与低辊相邻的高辊辊 6 之上的带材张应力比其他高辊上同位置带材张应力都大, 辊高差越大, 带材最大张应力区域越广.

(3) 除了低辊及相邻高辊之外其他不存在辊高差的五个高辊之上的带材张应力基本相同.

(4) 观察 (b1)、(c1) 组图, (b2)、(c2) 组图和 (b3)、(c3) 组图发现: 同一辊高差下, 厚度为 1 mm 与 4 mm 带材的最大张应力区和最小张应力区的分

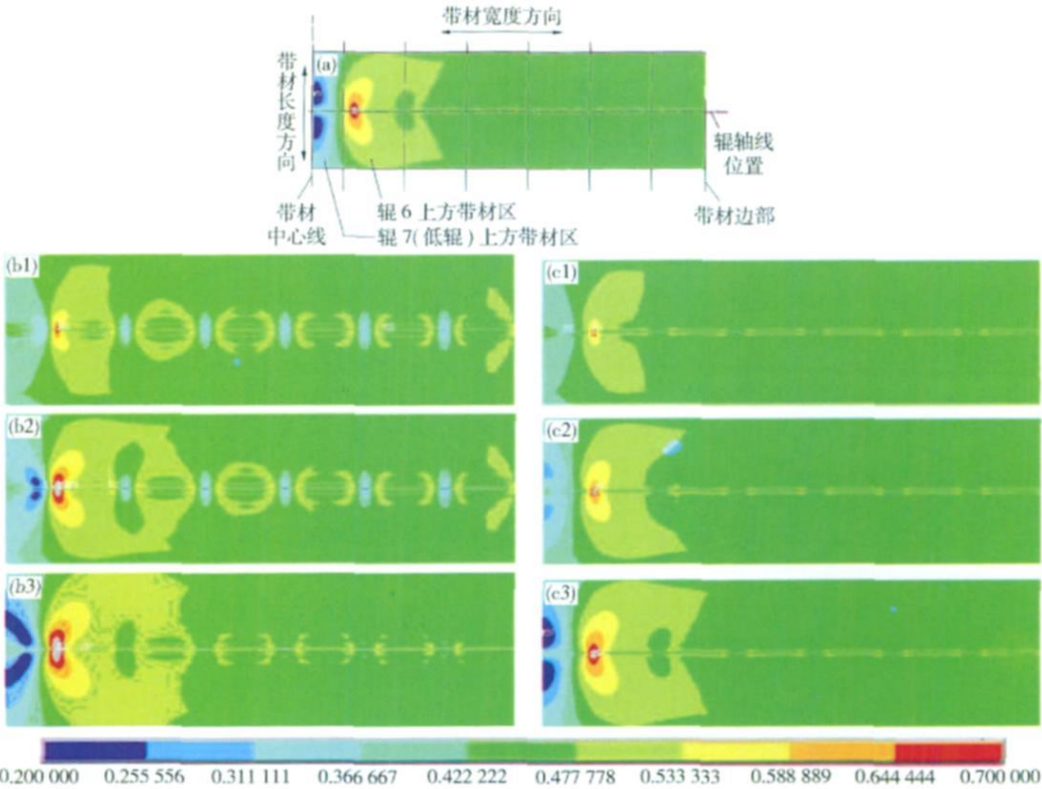


图 8 存在辊高差时带材中性面的张应力分布 (单位: MPa). (a) 带材张应力分布注解: (b1) $h=1\text{ mm}$, $\Delta h_{\max}=0.015\text{ mm}$; (b2) $h=1\text{ mm}$, $\Delta h_{\max}=0.03\text{ mm}$; (b3) $h=1\text{ mm}$, $\Delta h_{\max}=0.045\text{ mm}$; (c1) $h=4\text{ mm}$, $\Delta h_{\max}=0.015\text{ mm}$; (c2) $h=4\text{ mm}$, $\Delta h_{\max}=0.03\text{ mm}$; (c3) $h=4\text{ mm}$, $\Delta h_{\max}=0.045\text{ mm}$

Fig. 8 Tensile stress distribution (unit: MPa) on the neutral plane of strips when the roller height difference exists. (a) illustration of tensile stress distribution of a strip; (b1) $h=1\text{ mm}$, $\Delta h_{\max}=0.015\text{ mm}$; (b2) $h=1\text{ mm}$, $\Delta h_{\max}=0.03\text{ mm}$; (b3) $h=1\text{ mm}$, $\Delta h_{\max}=0.045\text{ mm}$; (c1) $h=4\text{ mm}$, $\Delta h_{\max}=0.015\text{ mm}$; (c2) $h=4\text{ mm}$, $\Delta h_{\max}=0.03\text{ mm}$; (c3) $h=4\text{ mm}$, $\Delta h_{\max}=0.045\text{ mm}$

布比较接近。

辊高差越大，低辊及旁边高辊对应的带材张应力分布情况差别越大，导致板形检测误差越大。

根据图 8 当辊高差相同时，厚度为 1mm 的带材在低辊及旁边高辊处的张应力分布情况与厚度为 4mm 的带材同位置处的张应力分布相近；若高低辊处张应力差是板形检测误差产生的唯一原因，则应得出同一辊高差下不同带厚的板形检测误差基本相同的结论。但是，图 7 结果却揭示，同一辊高差下，带材越厚，产生的板形检测误差越大，由此说明辊高差导致的高低辊处带材张应力差不是此类板形检测误差产生的唯一原因。

为进一步探究误差产生原因，分析了低辊面与其相邻高辊面上带材的弯曲变形，如图 9 所示。当带材具有一定平均张应力后，低辊之上的带材必须

发生辊高方向上的弯曲变形才可以由初始的不接触状态变为与低辊面接触的状态。若各分段辊部件为完全刚性，则只有带材发生变形；但由于分段辊部件为常温钢材质，存在大的刚度，在受力时会产生微量变形，同时高温带材也具有一定的弹性模量和一定厚度，因此实际情况是带材和高低辊部件之间发生协调变形。在高辊与低辊相邻的端部，带材由高位逐渐降至低位，此端部处带材（具有一定平均张应力）在弯曲变形后会对高辊产生作用力。辊高差越大、带材越厚，带材的弯曲量就越大，弯曲变形后的带材对高辊的作用力也越大，对相邻低辊的作用力相应减小，从而在各辊传感器处产生力差，导致板形检测误差。误差量取决于辊高差、带材在辊高方向的弯曲刚度（包含带材的弹性模量、带厚和弯曲区的宽度等因素）以及分段辊、支撑部件的竖直刚度 K 。

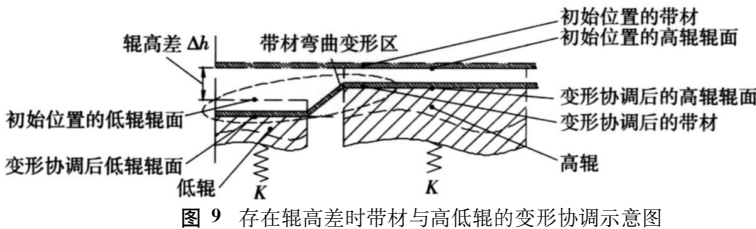


图 9 存在辊高差时带材与高低辊的变形协调示意图

Fig. 9 Deformation coordination sketch of the strip and rollers when the roller height difference exists

综上所述，辊高差的存在使高低辊处带材的张应力分布情况出现差别，加上低辊附近带材发生弯曲变形，导致对高辊作用力增大、对低辊作用力减小。这两方面构成辊高差导致板形检测误差的主要原因。

3 结论

(1) 当辊高差为定值时，高低辊分布情况对板形检测精度有明显影响。因此，在对张力计的各分段辊辊面进行调整时，应尽量避免分段辊辊面一高一低的间隔分布，并尽可能将各辊面由中部到边部按最低辊面至最高辊面的顺序布置，以减小板形检测误差。

(2) 板形检测误差随分段辊辊高差、带厚的增加而增大；在带厚一定、带材具有较大平均张应力时，板形检测误差和辊高差基本呈线性比例关系。

(3) 当辊高差为 0.030mm，通过有限元计算得到的带厚为 1、2、3 和 4mm 的板形检测误差分别为 1.48、2.62、4.46 和 6.46。说明此时对于带厚 1~4mm 的带材张力计可以保证较好的板形检测精度，使误差在 6.5 以下，而德马克-西马格公司在实

际使用中为保证张力计检测精度就是将辊高差限定为 0.030mm。

(4) 在实际热连轧生产中，带材平均张应力会有波动，不同厚度的热轧带材的实际平均张应力也有所不同，因此了解带材平均张应力对一定辊高差下板形检测误差的影响情况有实际工程意义。

参 考 文 献

[1] Wang G D. Shape Control and Shape Theory. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986.
(王国栋. 板形控制和板形理论. 北京: 冶金工业出版社, 1986)

[2] Liu H. Application of ABB shape measurement system in Baosteel 1800mm cold rolling train. Metall Ind Autom, 2006, 30(1): 61.
(刘浩. ABB板形测量系统在宝钢 1800mm 冷连轧机组的应用. 冶金自动化, 2006, 30(1): 61)

[3] Scottow C. Shape measurement and coolant spray solutions for rolling mills. MPT Metall Plant Technol Int, 2002, 25(1): 72.

[4] Peng K X, Tong C N, Dong J et al. Shape control system for 1400mm cold aluminum strip-foil mill. Metall Ind Autom, 2004, 28(4): 32.
(彭开香, 童朝南, 董洁, 等. 1400mm 铝带箔冷轧机板形控制系统. 冶金自动化, 2004, 28(4): 32)

for categorical attributes// Proceedings of International Conference of Data Engineering. Sydney. 1999; 512

[5] Slonim N, Tishby N. Document clustering using word clusters via the information bottleneck method// Proceedings of the 23rd Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. Athens. 2000; 208

[6] Barbara D, Li Y, Couto J. COOLCAT: an entropy-based algorithm for categorical clustering// Proceedings of the 11th International Conference on Information and Knowledge Management. McLean. 2002; 582

[7] Andritsos P, Tsaparas P, Miller R J, et al. LMBO: scalable clustering of categorical data// Proceedings of 9th International Conference on Extending Database Technology. Heraklion. 2004; 123

[8] Shan S M, Wang X Y, Zhang X C. Clustering algorithm for mining subspace clusters in categorical data sets. J Chin Comput Syst. 2009, 30(10); 2016
(单世民, 王新艳, 张宪超. 高维分类属性的子空间聚类算法. 小型微型计算机系统, 2009, 30(10); 2016)

[9] Wu S, Gao X D. CABOSFV algorithm for high dimensional sparse data clustering. J Univ Sci Technol Beijing. 2004, 11(3); 283

[10] Ghoting A, Parthasarathy S, Otey M E. Fast mining of distance-based outliers in high-dimensional datasets. Data Min Knowl Disc. 2008, 16(3); 349

[11] Ahmad A, Dey L. A k-mean clustering algorithm for mixed numeric and categorical data. Data Knowl Eng. 2007, 63; 503

(上接第 1077 页)

[5] Academic Committee for Hot Rolling Plate and Strip of The Chinese society for metals. Chinese Rolling Mill and Production Technology for Hot Wide Strip. Beijing: Metallurgical Industry Press. 2004
(中国金属学会热轧板带学术委员会. 中国热轧宽带钢轧机及生产技术. 北京: 冶金工业出版社, 2004)

[6] Fabian W, Wladika H, Tappe W, et al. On-line flatness measurement and control of hot wide strip. MPT Metall Plant Technol Int. 1985, 8(4); 68

[7] Kopineck H J, Tappe W. New on-line measuring and testing systems for steel strip. MPT Metall Plant Technol Int. 1990, 13(1); 70

[8] Hong W K, Yi J J. Flatness control using a contact type of shapener for continuous hot strip rolling. Steel Time Int. 2000, 24(6); 28

[9] Hong W K, Yi J J. Apparatus for Measuring the Strip Flatness. US Patent. 6427507. 2002-08-06

[10] Li M W, Bian X X, Chen G, et al. Strip Flatness Measurement Device of Looper Type. China Patent. 201034548. 2008-3-12
(李谋渭, 边新孝, 陈工, 等. 活套辊式平坦度检测装置: 中国专利, 201034548. 2008-3-12)